

从有序组装到高分辨显示:像素化量子点超晶格发光二极管

潘嘉琳, 王亚坤*

(苏州大学, 功能纳米与软物质研究院, 江苏省碳基功能材料与器件重点实验室, 仿生界面材料科学全国重点实验室,
江苏 苏州 215123)

摘要: 量子点超晶格由于量子点间有序堆积与增强的点间耦合效应, 在高性能发光器件中展现出重要应用潜力。然而, 如何将具有结构连贯性的超晶格进一步转化为器件兼容的图案化薄膜, 仍是其应用于高分辨率显示技术的关键挑战。近期, 杨绪勇、Taw-Woo Lee, 以及吴雨辰等在《Nature》报道了一种像素化钙钛矿量子点超晶格发光二极管。该工作通过配体-氟协同稳定策略制备出具有高几何对称性和优异胶体稳定性的菱形十二面体 CsPbBr₃ 量子点, 并结合毛细液桥限域组装, 成功构筑了兼具面内长程有序、垂直超薄限域和精确图案化特征的超晶格薄膜阵列。基于该结构, 器件实现了 30.9% 的峰值外量子效率、117144 cd m⁻² 的最大亮度和 5080 PPI 的像素密度, 并完成了有源矩阵显示验证。该研究为有序量子点超晶格在高分辨显示中的应用提供了新思路。

关键词: 钙钛矿量子点; 超晶格; 像素化发光二极管; 有序组装; 高分辨显示

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20260153

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260153

From Ordered Assembly to High-Resolution Displays: Pixelated Quantum-Dot Superlattice Light-Emitting Diodes

Pan Jia-Lin, Wang Ya-Kun*

(Institute of Functional Nano and Soft Materials (FUNSOM), Jiangsu Key Laboratory for Carbon-Based Functional Materials & Devices, State Key Laboratory of Bioinspired Interfacial Materials Science, Soochow University, Suzhou, China.)

* Corresponding Author, E-mail: wangyakun@suda.edu.cn

Abstract: Quantum-dot superlattices exhibit collective optoelectronic properties originating from ordered interdot packing and enhanced interdot coupling, and are therefore considered a promising material platform for high-performance light-emitting devices. However, translating structurally coherent superlattices into device-compatible patterned thin films remains a key challenge for their application in high-resolution display technologies. Recently, Xuyong Yang, Taw-Woo Lee, and Yuchen Wu et al. reported pixelated perovskite quantum-dot superlattice light-emitting diodes in *Nature*. In this work, rhombic dodecahedral CsPbBr₃ quantum dots with high geometric symmetry and robust colloidal stability were developed through a ligand-fluoride co-stabilization strategy. Combined with capillary liquid-bridge confined assembly, this approach enabled the fabrication of superlattice thin-film arrays featuring in-plane long-range order, ultrathin vertical confinement and precise spatial patterning. The resulting devices achieved a peak external quantum efficiency of 30.9%, a maximum luminance of 117144 cd m⁻² and a pixel density of 5080 pixels per inch, and were further demonstrated in an active-matrix display. This work provides a viable route for applying or-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62522514, 62474119 和 62175171)、姑苏创新创业领军人才计划(ZXL2024367)、国家重点研发计划(2024YFA1209500)、中国博士后科学基金(2025M780125)、江苏省基础研究专项(BK20250810)、江苏省优秀博士后人才资助计划(2025ZB341)

National Natural Science Foundation of China (NSFC) (62522514, 62474119 and 62175171), Gusu Innovation and Entrepreneurship Leading Talent Program (ZXL2024367), National Key research and Development Program of China (2024YFA1209500), China Postdoctoral Science Foundation (2025M780125), Basic Research Program of Jiangsu (BK20250810), Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent (2025ZB341).

dered quantum-dot superlattices in high-resolution display technologies.

Keywords: Perovskite quantum dots; superlattices; pixelated light-emitting diodes; ordered assembly; high-resolution displays

量子点(Quantum Dots, QDs)超晶格是由量子点以均一粒子间距和特定晶体学取向组装形成的有序超结构^[1,2]。相较于传统无序量子点,超晶格体系展现出更强的电子耦合、更高的载流子迁移能力以及协同的光学响应行为,在发光、探测和显示等光电领域具有重要的研究价值^[3-6]。然而,现有研究多集中于块体超晶体或较厚的组装体,针对器件所需的超薄发光薄膜,其应用仍十分有限^[7]。尤其对于高分辨显示器件而言,发光层不仅需要长程有序结构,还需同时满足纳米尺度的垂直限域与微米尺度的精准图案化,这使得量子点超晶格在实际像素器件中的构筑长期面临困难。

在钙钛矿量子点发光二极管(Light-Emitting Diodes, LEDs)中,发光层通常采用旋涂法制备^[8]。该方法虽然工艺简便,但由于溶剂挥发速度快,量子点在成膜过程中难以完成充分扩散、旋转和热力学重排,往往只能形成短程无序堆积结构。进一步在像素图案化过程中,溶剂作用或热处理还会加剧点间异质性、非辐射复合和离子迁移,从而限制器件在亮度、效率和稳定性方面的协同提升^[9]。针对这一问题,Zhang等提出了一种面向像素化器件的钙钛矿量子点超晶格薄膜构筑策略,尝试将量子点超晶格引入高分辨显示器件中。

该工作的关键首先在于超晶格基元的设计。作者采用配体-氟协同稳定策略,制备出具有菱形十二面体形貌的钙钛矿(CsPbBr_3)量子点。相较于更常见的立方体量子点,菱形十二面体具有更高的多面体几何对称性和更丰富的等价接触面,可在组装过程中提供多方向的面-面堆积路径,有利于缓解局部取向失配和层间错位,从而促进致密且长程有序的超晶格排列。其中,N,N-双(2-(3-溴苯基)-2-羟乙基)十八烷-1-铵(N,N-bis(2-(3-bromophenyl)-2-hydroxyethyl)octadecan-1-aminium, BHOA)配体通过羰基与表面 Pb^{2+} 形成较强配位作用,从而提高表面结合强度并改善量子点的单分散性;随后再利用四丁基氟化铵(tetrabutylammonium fluoride, TBAF)进行表面氟化重构,进一步增强配体结合稳定性。BHOA配体-氟协同稳定

后的 CsPbBr_3 量子点在溶液和薄膜状态下均表现出更高的光学与环境稳定性,为后续长程有序超晶格薄膜的构筑奠定了材料基础。

在此基础上,作者进一步发展了毛细液桥限域组装方法。通过构筑顶部亲液、侧壁疏液的微柱模板,使量子点溶液局域限制于模板与基底之间形成离散液桥,在缓慢蒸发过程中诱导量子点沿平面方向有序结晶。最终获得的 CsPbBr_3 超晶格薄膜宽度约 $10\ \mu\text{m}$ 、厚度约 $25\ \text{nm}$ (相当于两层量子点单层厚度),并在微米尺度上呈现出显著的面内长程有序。与未优化表面的量子点相比,BHOA配体-氟协同体系能够形成结构更完整、发光更稳定的超晶格薄膜。

结构表征结果进一步揭示了有序组装对光电性质的显著影响。GISAXS、GIWAXS和GIXRD测试表明,该超晶格薄膜具有明确的三维周期性和更强的晶体学取向。瞬态吸收结果显示,组装薄膜相较旋涂对照样品具有更窄的漂白线宽、更小的峰位漂移和更快的饱和过程,表明局部堆积无序所引起的能量涨落和向带尾态的弛豫过程被有效抑制。与此同时,稳态发光谱表现出轻微红移和半峰宽减小,说明量子点间电子耦合增强、发光态分布更均一。温度依赖输运测试表明,旋涂对照薄膜表现出典型的热激活跳跃输运行为,即载流子迁移率随温度升高而单调增加。相比之下,超晶格薄膜中的迁移率随温度升高呈现先升高后降低的趋势,并在 $188\ \text{K}$ 时出现输运行为转变。当迁移率随温度升高而降低,即 $d\mu/dT < 0$ 时,该超晶格薄膜表现出类能带输运特性,表明长程有序超晶格中已形成更强的相干点间耦合^[10]。这些结果共同表明,钙钛矿量子点超晶格薄膜中的结构一致性降低能量无序性并增强电子耦合,从而推动载流子输运由离散无序跳跃转变为更高迁移率、低能量损失的有序传输。同时,均一化的能量分布有助于减弱局部电流集中、界面复合及强电场诱导退化,最终协同提升高效LED器件所需的电荷迁移率与发光效率。

基于上述超晶格薄膜,作者构筑了像素化 CsPbBr_3 发光二极管。通过调节微柱尺寸,实现了

从 20 μm 到 3 μm 的多种像素尺寸, 对应分辨率由 1154 PPI 提高至 5080 PPI, 已超过近眼虚拟/增强现实微显示通常所要求的 3000 PPI。器件在 519 nm 处表现出稳定的绿色电致发光, 相比旋涂器件, 其暗电流更低、工作电流密度更高、开启电压更低。最佳器件的峰值外量子效率达到 30.9%, 最大亮度达到 117144 cd m^{-2} ; 在 40 个器件统计中, 平均 EQE 达到 27.4%, 显著优于对照器件。更为突出的是, 其在 100 cd m^{-2} 下外推 T_{50} 达到 12411 h, 不仅高于旋涂对照器件, 也较已报道像素化钙钛矿 QD-LED 提升超过三个数量级^[11]。

为了验证其实用显示潜力, 作者将该像素化超晶格发光层直接集成到商用低温多晶硅薄膜晶体管背板上, 成功制备出 1.85 英寸有源矩阵显示器。所得显示面板具有较高像素良率、均匀发光

和清晰边界, 可实现静态灰度图像显示以及动态图像播放。该结果表明, 这一超晶格组装策略不仅能够改善单器件性能, 而且具备与现有商用显示背板兼容的潜力。进一步地, 作者还将这一像素化超晶格策略拓展至蓝光和红光钙钛矿量子点体系, 显示出向全彩显示发展的可能性。

综上所述, 通过量子点表面调控、粒子形貌设计与毛细液桥限域组装的协同作用, 杨绪勇、Taw-Woo Lee、以及吴雨辰等成功构筑了兼具长程有序、超薄限域和像素化图案的钙钛矿量子点超晶格发光薄膜, 并实现了高效率、高亮度、高分辨率和高稳定性的像素化发光器件。该研究突破了量子点超晶格难以与超薄图案化器件兼容的瓶颈, 为有序量子点组装体在新一代高性能显示中的应用提供了新的材料设计思路和器件构筑方法。

参 考 文 献:

- [1] RAINÒ G, BECKER M A, BODNARCHUK M I, *et al.* Superfluorescence from lead halide perovskite quantum dot superlattices[J]. *Nature*, 2018, 563(7733): 671-675.
- [2] CHERNIUKH I, RAINO G, STOFERLE T, *et al.* Perovskite-type superlattices from lead halide perovskite nanocubes [J]. *Nature*, 2021, 593(7860): 535-542.
- [3] LAN X, CHEN M, HUDSON M H, *et al.* Quantum dot solids showing state-resolved band-like transport[J]. *Nat. Mater.*, 2020, 19(3): 323-329.
- [4] TAHARA H, SAKAMOTO M, TERANISHI T, *et al.* Coherent electronic coupling in quantum dot solids induces cooperative enhancement of nonlinear optoelectronic responses[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2024, 19(6): 744-750.
- [5] SHEN W-S, XIE L-M, FEI W-L, *et al.* Dipole-assisted functionalization enables long-range ordering of ZnTeSe quantum dots for efficient and stable deep-blue electroluminescence[J]. *Nat. Photonics*, 2026.
- [6] WANG Y-K, WAN H, TEALE S, *et al.* Long-range order enabled stability in quantum dot light-emitting diodes[J]. *Nature*, 2024, 629(8012): 586-591.
- [7] GUO D, SELBY T A, KAHMANN S, *et al.* Picosecond quantum transients in halide perovskite nanodomain superlattices [J]. *Nat Nanotechnol.*, 2025, 20(12): 1771-1778.
- [8] LI H H, WANG Y, LIU Z S, *et al.* Hybrid-Dimensional Heterostructure Enables Efficient Near-Infrared Perovskite Quantum Dot Light-Emitting Diodes[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(28): 25930-25938.
- [9] KWON J I, PARK G, LEE G H, *et al.* Ultrahigh-resolution full-color perovskite nanocrystal patterning for ultrathin skin-attachable displays[J]. *Sci. Adv.*, 2022, 8(43): eadd0697.
- [10] SEPTIANTO R D, MIRANTI R, KIKITSU T, *et al.* Enabling metallic behaviour in two-dimensional superlattice of semiconductor colloidal quantum dots[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 2670.
- [11] LI Z J, CHU S L, ZHANG Y H, *et al.* Mass Transfer Printing of Metal-Halide Perovskite Films and Nanostructures[J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(35): 2203529.



潘嘉琳(2000-), 女, 山东烟台人, 苏州大学博士研究生, 主要从事量子点发光材料与电致发光器件研究。
E-mail: 20227914006@stu.suda.edu.cn



王亚坤(1990-), 男, 河南安阳人, 博士, 教授, 2020年于苏州大学获得博士学位, 主要从事量子点发光材料与电致发光器件研究。
E-mail: wangyakun@suda.edu.cn